Курс «Алгоритмы и алгоритмические языки»
1 семестр 2018/2019

Лекция 15

VLA-массивы

- В Си-89 размер массива обязан являться константой. Это неудобно при передаче массивов (многомерных) в функции:

```
/* можно передать int a[5]; int a[42]; ... */
int asum1d (int a[], int n) {
  int s = 0;
  for (int i = 0; i < n; i++)
    s += a[i];
  return s;
}
/* можно передать только int a[???][5] */
int asum2d (int a[][5], int n) {
  int s = 0;
  for (int i = 0; i < n; i++)
    for (int j = 0; j < 5; j++)
      s += a[i][j];
  return s;
}
```

VLA-массивы

- В Си-99 размер массива автоматического класса памяти может задаваться во время выполнения программы (Си-11 сделал VLA необязательными, проверка через макрос **__STDC_NO_VLA__**):

```
int foo (int n) {
  int a[n];
  <... Можно обрабатывать a[i]...>
}
/* можно передать int a[???][???] */
int asum2d (int m, int n, int a[m][n]) {
  int s = 0;
  for (int i = 0; i < m; i++)
    for (int j = 0; j < n; j++)
      s += a[i][j];
  return s;
}
```

- Объявление функции asum2d:

```
int asum2d (int m, int n, int a[m][n]);
int asum2d (int, int, int [*][*]);
```

VLA-массивы и динамическое выделение памяти

- Функция asum2d может использоваться с VLA-массивами, но они всегда выделяются в автоматической памяти:

```
int foo (int m, int n) {
  int a[m][n]; int s;
  <... Считаем a[i][j]...>
  s = asum2d (m, n, a);
}
```

- Можно выделить VLA-массив в динамической памяти:

```
int main (void) {
  int m, n;
  scanf ("%d%d", &m, &n);
  int (*pa)[n];
  pa = (int (*)[n]) malloc (m * n * sizeof (int));
  <... Считаем pa[i][j]...>
  s = asum2d (m, n, pa);
  free (pa);
}
```

Динамическое распределение памяти

- Состав функций динамического распределения памяти библиотеки **`stdlib`** (заголовочный файл **`<stdlib.h>`**)

```
void *malloc (size_t size);
void free (void *p);
void *realloc (void *p, size_t size);
void *calloc(size_t num, size_t size);
```

- Функция
  `void *calloc (size_t num, size_t size)`
  работает аналогично функции **`malloc (size1)`**,
  где **`size1`** = **`num * size`** (т.е. выделяет память для размещения массива из **`num`** объектов размера **`size`**).

  <u>Выделенная память инициализируется нулевыми значениями</u>

Динамическое распределение памяти

- Функция
  `void *realloc (void *p, size_t size)`
  согласно стандарту Си99 сначала выполняет **`free (p)`**, а потом **`p = malloc (size)`**, возвращая новое значение указателя **`p`**. При этом значения первых **`size`** байтов новой и старой областей совпадают.

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
int main(void) {
  int *p = (int*)malloc (sizeof(int));
  int *q = (int*)realloc (p, sizeof(int));
  *p = 1;
  *q = 2;
  if (p == q)
    printf ("%d %d\n", *p, *q);
  return 0;
}
```

```
$ clang -O2 realloc.c && ./a.out
1 2
```

Массив переменного размера в структуре (C99)

- Flexible array member – последнее поле структуры:

```
struct polygon {
  int np; /* число вершин */
  struct point points[];
}
```

- Варьирование размера переменного массива:

```
int np; struct polygon *pp;
scanf ("%d", &np);
pp = malloc (sizeof (struct polygon)
             + np * sizeof (struct point));
pp->np = np;
for (int i = 0; i < np; i++)
  scanf ("%d%d", &pp->points[i].x,
            &pp->points[i].y);
```

Отладка программ

- Все программы содержат ошибки, отладка – это процесс поиска и удаления некоторых ошибок
- Существуют другие методы обнаружения ошибок (тестирование, верификация, статические и динамические анализаторы кода), но их применение не гарантирует отсутствия ошибок
- Для отладки используют инструменты, позволяющие получить информацию о поведении программы на некоторых входных данных, не изменяя ее поведения
- Простейший метод: *отладочная печать*

```
int *a; int n;
n = read_array (a);
debug_array (a, n);
```

```
static void debug_array (int *a, int n) {
  fprintf (stderr, "Array (%d)", n);
  for (int i = 0; i < n; i++)
    fprintf (stderr, "%d ", a[i]);
  fprintf (stderr, "\n");
}
```

- Отладочная печать может контролироваться макросом (**NDEBUG**)

Отладка программ: отладчики

- Отладчик – основной инструмент отладки программы
- Отладчик позволяет
  - запустить программу для заданных входных данных
  - останавливать выполнение по достижении заданных точек программы безусловно или при выполнении некоторого условия на значения переменных
  - останавливать выполнение, когда некоторая переменная изменяет свое значение
  - выполнить текущую строку исходного кода программы и снова остановить выполнение
  - посмотреть/изменить значения переменных, памяти
  - посмотреть текущий стек вызовов
- Необходимое условие для отладки на уровне исходного кода: наличие в исполняемом файле программы *отладочной информации* (связи между командами процессора и строками исходного кода программы, связь между адресами и переменными и т.д.)

Отладка программ: отладчик `gdb`

- Компиляция с отладочной информацией: **`gcc -g`**
- Некоторые команды **`gdb`**
  - **`gdb <file> --args <args>`** – загрузить программу с заданными параметрами командной строки
  - **`run/continue`** – запустить/продолжить выполнение
  - **`break <function name/file:line number>`** – завести безусловную *точку останова*
  - **`cond <bp#> condition`** – задать условие остановки выполнения для некоторой точки останова
  - **`watch <variable/address>`** – задать *точку наблюдения* (остановка выполнения при изменении значения переменной или памяти по адресу)
  - **`next/step`** – выполнить текущую строку исходного кода программы без захода/с заходом в вызываемые функции
  - **`print <var>/set <var> = expression`** – посмотреть /изменить текущие значения переменных, памяти
  - **`bt`** – посмотреть текущий стек вызовов
- Среда Code::Blocks поддерживает **`gdb`** в своем интерфейсе

Отладка программ: примеры команд gdb

- Установка точек останова
  - можно использовать '.' вместо '->'

```
b fancy_abort
b 7199
b sel-sched.c:7199
cond 2 insn.u.fld.rt_int == 112
cond 3 x_rtl->emit.x_cur_insn_uid == 1396
```

- Просмотр и изменение значений переменных

```
p orig_ops.u.expr.history_of_changes.base
p bb->index
set sched_verbose=5
call debug_vinsn (0x4744540)
```

- Установка точек наблюдения

```
wa can_issue_more
wa ((basic_block) 0x7ffff58b5680)->preds.base.prefix.num
```

Поиск ошибок работы с памятью

- Частые ошибки работы с динамической памятью тяжело отлаживать (даже в небольших программах)
- Ошибки доступа за границы буфера
  Ошибки использования неинициализированного или уже освобожденного указателя
  Недостаточный размер буфера
- Разработан ряд инструментов анализа, которые облегчают жизнь программисту
- valgrind: динамический двоичный транслятор (http://valgrind.org)
- sanitizers: компиляторная инструментация от Google https://github.com/google/sanitizers/wiki

- Disclaimer: Linux-only tools

Поиск ошибок работы с памятью

- valgrind: динамический двоичный транслятор (плюс набор инструментов, ваш – memcheck)

```
#include <stdlib.h>
void f(void) {
   int* x = malloc(10 * sizeof(int));
   x[10] = 0;        // problem 1: heap block overrun
}
int main(void) {
   f();
   return 0;
}
$ gcc -Og -g -o me && valgrind ./me
==27164== Memcheck, a memory error detector
==27164== Copyright (C) 2002-2015, and GNU GPL'd, by Julian Seward et al.
==27164== Using Valgrind-3.11.0 and LibVEX; rerun with -h for copyright info
==27164== Command: ./me
==27164==
==27164== Invalid write of size 4
==27164==    at 0x400554: f (me.c:4)
==27164==    by 0x400568: main (me.c:7)
==27164==  Address 0x51da068 is 0 bytes after a block of size 40 alloc'd
==27164==    at 0x4C2C12F: malloc (in /usr/lib64/valgrind/vgpreload_memcheck-amd64-linux.so)
==27164==    by 0x400553: f (me.c:3)
==27164==    by 0x400568: main (me.c:7)
```

Поиск ошибок работы с памятью

- sanitizers: встроенная в gcc/clang инструментация (нас интересует address sanitizer)

```
#include <stdlib.h>
void f(void) {
    int* x = malloc(10 * sizeof(int));
    x[10] = 0;        // problem 1: heap block overrun
}
int main(void) {
    f();
    return 0;
}
```

```
$ gcc -Og -g -fsanitize-address -o mesa && ./mesa
==27179==ERROR: AddressSanitizer: heap-buffer-overflow on address 0x60400000dff8 at pc
0x0000004007c1 bp 0x7fffc32a1420 sp 0x7fffc32a1418
WRITE of size 4 at 0x60400000dff8 thread T0
    #0 0x4007c0 in f /home/bonzo/tmp/me.c:4
    #1 0x4007d5 in main /home/bonzo/tmp/me.c:7
    #2 0x7fba219d870f in __libc_start_main (/lib64/libc.so.6+0x2070f)
    #3 0x4006b8 in _start (/home/bonzo/tmp/mesa+0x4006b8)
0x60400000dff8 is located 0 bytes to the right of 40-byte region
[0x60400000dfd0,0x60400000dff8)
allocated by thread T0 here:
    #0 0x7fba21df074a in malloc (/usr/lib64/libasan.so.2+0x9674a)
    #1 0x400793 in f /home/bonzo/tmp/me.c:3
SUMMARY: AddressSanitizer: heap-buffer-overflow /home/bonzo/tmp/me.c:4 f
```

Вычисления с плавающей точкой

- Предпосылки: дробные двоичные числа
- Стандарт арифметики с плавающей точкой IEEE 754: Определение
- Пример и свойства
- Округление, сложение, умножение
- Плавающие типы языка Си
- Флаги компилятора gcc

Дробные двоичные числа

- Что такое 1011.101_2 ?

$$1\times 2^{3}+0\times 2^{2}+1\times 2^{1}+1\times 2^{0}+1\times 2^{-1}+0\times 2^{-2}+1\times 2^{-3}=$$

$$=11\frac{5}{8}=11.625$$

Дробные двоичные числа

- $0.111111\ldots_2 = 1.0-\varepsilon\ (\varepsilon \to 0)$, так как

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \ldots + \frac{1}{2^n} + \ldots \to 1 \quad \text{при } n \to \infty$$

- Точно можно представить только числа вида $\frac{x}{2^k}$

- Остальные рациональные числа представляются периодическими двоичными дробями:

$$\frac{1}{5} = 0.(0011)_2$$

- Иррациональные числа представляются апериодическими двоичными дробями и могут быть представлены только приближенно

Представление чисел с плавающей точкой (IEEE 754)

- Числа с плавающей точкой представляются в нормализованной форме: $(-1^{s})\ M\ 2^{e}$
  - s – код знака числа (он же знак мантиссы)
  - M – мантисса ($1 \le M < 2$)
  - e – (двоичный) порядок

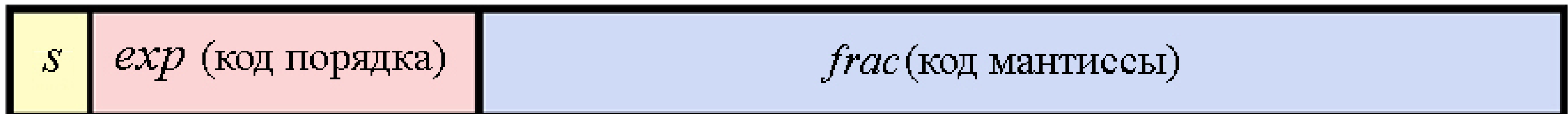
- Первая цифра мантиссы в нормализованном представлении всегда 1. В стандарте принято решение не записывать в представление числа эту единицу (тем самым мантисса как бы увеличивается на разряд).

  Экономия связана с тем, что в представление числа записывается не M, а $frac = M - 1$

Представление чисел с плавающей точкой

- Чтобы не записывать отрицательных чисел в поле порядка, вводится ***смещение*** $bias = 2^{k-1} - 1$, где k – количество бит в поле для записи порядка, и вместо порядка e записывается код порядка exp, связанный с e соотношением $e = exp - bias$.

- Нормализованное число $(-1^{s})\ M\ 2^{e}$ упаковывается в машинное слово (структуру) с полями s, $frac$ и exp



Ширина поля s всегда равна 1.

Ширина полей exp и $frac$ зависит от точности числа

Представление чисел с плавающей точкой

- Одинарная точность (32 бита):

8 бит 23 бита

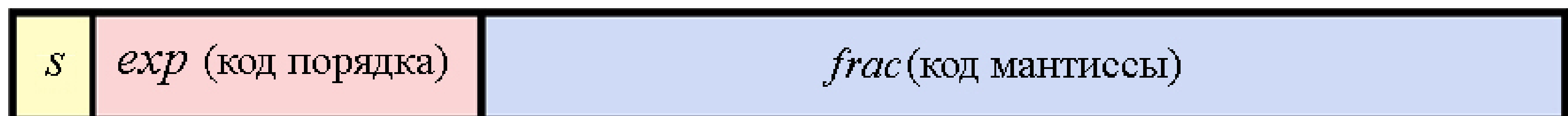
$bias = 127; \quad -126 \le e \le 127\ ; \quad 1 \le exp \le 254$

- Двойная точность (64 бита):

11 бит 52 бита

$bias = 1023; \quad -1022 \le e \le 1023\ ; \quad 1 \le exp \le 2046$

- Повышенная точность (80 бит):



15 бит 64 бита

Представление чисел с плавающей точкой

- Пример

  - **Значение** `float f = 15213.0`

    $15213_{10} = 11101101101101_2 = 1.1101101101101_2 \times 2^{13}$

  - **Значащая часть**

    $M = 1.\underline{1101101101101}_2$,

    $frac = \underline{1101101101101}0000000000_2$

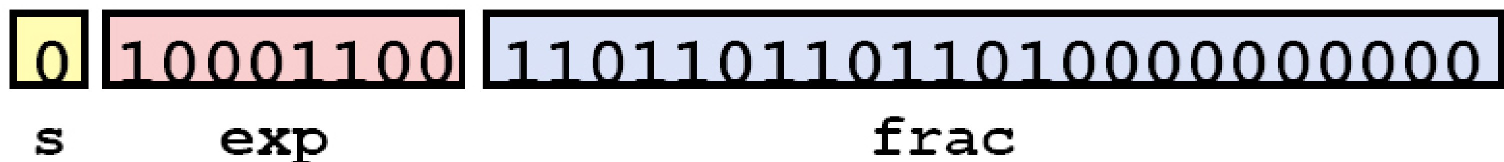
  - **Порядок**

    $e = 13$

    $bias = 127$

    $exp = 140 = 10001100_2$

  - **Результат**



Представление нуля

- Для типа **float** код порядка **exp** изменяется от **00000001** до **11111110** (значению **00000001** соответствует порядок **e = - 126**, значению **11111110** – порядок **e = 127**)

- Код **exp = 00000000, frac = 000…0** представляет нулевое значение; в зависимости от значения знакового разряда **s** это либо **+0** либо **-0**

- А какое значение представляют коды
  exp = 00000000, frac ≠ 000…0?
  exp = 11111111?

Большие числа

Пусть **`exp = 111…1`**

- ◊ если при этом **`frac = 000…0`**, то коду будет соответствовать значение ∞ (со знаком **`s`**)
- ◊ если же **`frac`** ≠ **`000…0`**, то код не будет представлять никакое число («значение», представляемое таким кодом, так и называется: «не число» – **`NaN`** – Not a number)

Денормализованные числа

- Это числа, представляемые кодами
  exp = 00000000, frac ≠ 000…0

- **exp** вносит в значение такого числа постоянный вклад 2^{-k-2},
  frac меняется от **000…01** до **111…1** *и* рассматривается уже не как мантисса, а как значение, умножаемое на **exp**

- Рассмотрим это на модельном примере: